

Verfahren zum Vermessen des Intensitätsprofils eines  
Elektronenstrahls, insbesondere eines Strahls eines  
Elektronenstrahlbearbeitungsgeräts, und/oder zum Vermessen  
05 einer Optik für einen Elektronenstrahl und/oder zum  
Justieren einer Optik für einen Elektronenstrahl, Meß-  
struktur für ein solches Verfahren und Elektronenstrahl-  
bearbeitungsgerät.

10 =====

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Vermessen des  
Intensitätsprofils eines Elektronenstrahls, insbesondere  
eines Strahls eines Elektronenstrahlbearbeitungsgeräts, und/  
15 oder zum Vermessen einer Optik für einen Elektronenstrahl  
und/oder zum Justieren einer Optik für einen Elektro-  
nenstrahl, eine Meßstruktur für ein solches Verfahren und  
ein Elektronenstrahlbearbeitungsgerät.

20 In der vorliegenden Beschreibung und den Ansprüchen  
soll unter Optik für einen Elektronenstrahl eine belie-  
bige Anordnung verstanden werden, welche die Geometrie  
des Strahlquerschnittes eines Elektronenstrahles und/oder  
die Ausrichtung der Strahlachse eines Elektronenstrahles  
25 beeinflussen kann. Es sind dies in der Praxis elektrische  
und/oder magnetische optische Komponenten, insbesondere  
elektrische und/oder magnetische Linsen, Stigmatoren und  
Ablenker.

30 Eine Optik kann durch eine einzige solche Komponente  
gebildet sein oder mehrerer solche Komponenten umfassen.

Um z.B. beim Elektronenstrahlschweißen Schweißnähte mit  
gleichbleibender und bekannter Güte erzeugen zu können, ist  
35 es von Vorteil, wenn man das Intensitätsprofil des im

Elektronenstrahlschweißgerät verwendeten Elektronenstrahls kennt und möglichst unmittelbar vor dem Prozeß vermessen kann.

- 05 Auch die Kenntnis der Abbildungseigenschaften einer Strahl-Optik des Elektronenstrahlbearbeitungsgeräts und die Möglichkeit, Strahlquerschnitt und Abbildungseigenschaften automatisch auf Sollwerte einzuregeln wären für das Bearbeiten von Werkstücken mit Elektronenstrahlschweißen  
10 von Vorteil.

- Üblicherweise erfolgt die Vermessung des Intensitätsprofils eines Elektronenstrahls so, daß nacheinander bekannte Teile des Elektronenstrahls in einen Auffänger, insbesondere einen Faraday-Käfig geleitet wird. Wie im Buch von  
15 Schultz "Elektronenstrahlschweißen", Fachbuchreihe Schweißtechnik, DVS-Verlag auf den Seiten 15 bis 20 beschrieben, können verschiedenartige Meßkörper eingesetzt werden, um einen Teil des Strahls in den Auffänger zu leiten,  
20 wobei der Elektronenstrahl mittels eines Magnetfelds relativ zu dem Meßkörper ausgelenkt wird, so daß nacheinander verschiedene Querschnittsteile des Elektronenstrahls in den Auffänger gelangen.

- 25 Der einfachste solche Meßkörper umfaßt eine Schwellenkante. Zwei gegenüberliegende derartige Meßkörper bilden eine Meßstruktur mit einer Schlitzblende, hinter der der durchgetretene Teil des Strahles durch einen dort liegenden Sensor gemessen wird. Durch eine solche Meßstruktur kann  
30 das Strahlprofil in einer Richtung vermessen werden. Mittels einer Lochblende kann das Intensitätsprofil eines Elektronenstrahls auch in einer zweiten Richtung dazu vermessen werden, wobei der Elektronenstrahl Teilstrahl für Teilstrahl nacheinander über das Loch geleitet wird,  
35 mittels des o. g. Magnetfelds, wobei die Steuertechnik

aus der Rasterelektronenmikroskopie bekannt ist.

Ein Nachteil im Stand der Technik besteht darin, daß  
ein auf der Achse der Elektronenkanone (nachstehend  
05 kurz: Strahlhauptachse) angeordneter Auffänger an der  
Stelle in einem Elektronenstrahlbearbeitungsgerät Platz  
wegnimmt, wo das Werkstück angeordnet wird. Ein abzweigend  
vom eigentlichen Elektronenstrahlengang in einem zweiten  
Strahlengang angeordneter Auffänger (Sensor) braucht  
10 zusätzlichen Platz. Auch hat man in diesem Falle für die  
Messung der Intensitätsprofile nicht exakt dieselben  
Verhältnis wie beim späteren Schweißen.

Es ist Aufgabe der Erfindung, bei kompakter Bauweise  
15 des Gerätes eine Elektronenstrahlvermessung zu ermöglichen.

Diese Aufgabe ist gelöst durch ein Verfahren mit den  
im Anspruch 1 aufgeführten Merkmalen.

20 Erfindungsgemäß wird der Elektronenstrahl durch eine  
Relativbewegung zu einer Meßstruktur auf verschiedene  
Stellen von dieser geleitet, die unterschiedliche Rück-  
streueigenschaften aufweisen und der Elektronenstrom der  
Rückstreuelektronen wird in Abhängigkeit von der Relativ-  
25 bewegung von Elektronenstrahl und Meßstruktur gemessen.

Unter Rückstreuelektronen wird im Rahmen der vorliegenden  
Anmeldung jedes von einer Oberfläche mit einer Komponente  
in Gegenrichtung zur eigentlichen Elektronenausbreitung  
30 zurückgesandte Elektronen verstanden, d.h. Rückstreu-  
elektronen im engeren Sinne und Sekundärelektronen.

Dadurch, daß die Rückstreuelektronen gemessen werden,  
kann ein entsprechender Sensor, beispielsweise ein Sensor-  
35 ring, um den Elektronenstrahl herum in der Nähe der ohnehin

vorhandenen Auslenkmagnete angeordnet werden, ohne daß zusätzlicher Platz benötigt wird.

Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens  
05 ist der, daß zu seiner Durchführung nur eine passive  
Meßstruktur zusätzlich benötigt wird, so daß zum Meß-  
raum keine zusätzlichen elektrischen Leitungen verlegt  
werden müssen, was bei für die Serienfertigung dienenden  
Elektronenstrahl-Schweißgeräten, bei den die Werkstücke  
10 auf Paletten angeordnet ein- und ausgeschleust werden,  
mit Schwierigkeiten verbunden wäre.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in Unter-  
ansprüchen angegeben.

15

Die Weiterbildung nach Anspruch 2 hat den Vorteil, daß  
Meßstrukturen, wie sie bereits bekannt sind, verwendet  
werden können, wobei der transmittierende Teil der Meß-  
struktur, also die Öffnung, nicht rückstreut und der  
20 Rest der Meßstruktur zumindest schwach rückstreut.

Bei einigen Elektronenstrahlbearbeitungsgeräten ist ohnehin  
vorgesehen, daß ein zu bearbeitendes Werkstück mittels  
einer Rasterelektronen-Bilderzeugungsfunktion vor dem  
25 Bearbeiten betrachtet werden kann. In diesem Falle ist es  
von besonderem Vorteil, die Erfindung einzusetzen, weil  
zur Bildgebung dieselben Sensoren verwendet werden können,  
wie sie als Rückstreuelektronenmeßgeräte dienen.

30 Mit der Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 3  
erhält man einen besonders guten Kontrast zwischen den  
durch den Meßkörper rückgestreuten Elektronen, die zum  
Ausmessen des Querschnittsprofils des Elektronenstrahls  
verwendet werden, und diffus von der Oberfläche einer  
35 Basis der Meßstruktur etwa rückgestreuten Elektronen.

Auch die Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 4 ist im Hinblick auf guten Kontrast bei der Ausmessung des Querschnittsprofiles von Vorteil.

05

Ist die zum Ausmessen des Strahlquerschnitts dienende Rückstreufäche von der Oberseite einer Basis der Meßstruktur beabstandet, wie im Anspruch 5 angegeben, wirkt sich dies ebenfalls günstig auf die Präzision der Messung und den Kontrast der Querschnittsmessung aus.

10

Die Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 6 ist im Hinblick auf niedere Herstellungskosten für kleine Rückstreufächen und im Hinblick auf guten Kontrast von Vorteil.

15

Auch die Weiterbildung gemäß Anspruch 7 dient einer Verbesserung des Rückstreuverhaltens der Rückstreufäche.

Mit der Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 8 wird erreicht, daß hinter der Rückstreufäche liegende Umfangsabschnitte der Nadel nicht zu zusätzlichen rückgestreuten Elektronen führen, was den Kontrast des Meßverfahrens beeinträchtigen würde.

25

Die Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 9 ist im Hinblick auf hohe Auflösung des Meßverfahrens von Vorteil.

Gemäß Anspruch 10 werden die rückgestreuten Elektronen auf sehr einfache Weise gemessen. Entsprechende Sensorringe sind auch in solchen Elektronenstrahlbearbeitungsgeräten oft schon vorhanden, bei denen auch die Möglichkeit zur rasterelektronischen Bilderzeugung einer Werkstückoberfläche besteht.

35

Im Prinzip kann man die Relativbewegung zwischen Elektronenstrahl und Meßstruktur sowohl durch eine Bewegung der Meßstruktur als auch durch eine Bewegung des Elektronenstrahles (als auch durch eine Bewegung von Elektronenstrahl und Meßstruktur) erzeugen. Die im Anspruch 11 angegebene Art der Erzeugung der Relativbewegung läßt sich aber ohne mechanische Mittel und sehr rasch durchführen und ermöglicht auch die Bestimmung der Qualität der Strahlablenkung durch die Optik.

10

Verwendet man bei dem Verfahren zum Bestimmen des Intensitätsprofils eines Elektronenstrahles eine Meßstruktur, wie sie im Anspruch 12 angegeben ist, so kann man das Intensitätsprofil gleichzeitig für eine Mehrzahl unterschiedlicher Auslenkungswinkel des Elektronenstrahles messen. Auf diese Weise läßt sich ermitteln, ob und in welchem Ausmaße das Intensitätsprofil von der Ablenkung des Elektronenstrahles abhängt.

20 Dabei kann man mit dem Verfahren gemäß Anspruch 13 das Intensitätsprofil innerhalb eines vorgegebenen Gesamt-Ablenkungsbereiches für den Elektronenstrahl an verschiedenen gleichförmig über den Ablenkbereich verteilten Stellen messen.

25

Dabei ist mit der Weiterbildung gemäß Anspruch 14 gewährleistet, daß die Rückstreulflächen jeweils senkrecht zur mittleren Richtung des Elektronenstrahles ausgerichtet sind.

30

Verwendet man gemäß Anspruch 15 kreisförmige Rückstreulflächen, so verhalten sich diese Rückstreulflächen isotrop, d.h., man kann in beliebiger Richtung über sie hinwegfahren, ohne daß richtungsabhängige Korrekturen der Meßsignale notwendig wären.

35

Verwendet man gemäß Anspruch 16 eine Meßstruktur mit schmalen rückstreuenden Bändern, so kann man auf einfache Weise eine grobe Information der Intensitätsverteilung  
05 im Elektronenstrahl über eine größere Meßfläche hinweg erhalten. Derartige Meßstrukturen eignen sich auch gut zum Austesten der Abbildungseigenschaften der Elektronenstrahl-Optik und als Ist-Signalgeber für eine Regelschal-  
10 tung, mit welcher der Querschnitt des Elektronenstrahles automatisch minimisiert wird und/oder Soll-Abbildungseigenschaften der Optik eingestellt werden.

Bei dem Verfahren gemäß Anspruch 17 wird das Intensitätsprofil des Elektronenstrahles in zwei zueinander senkrechten  
15 Richtungen gemessen, so daß man eine vollständige flächenhafte Information über die Energiedichte im Elektronenstrahl hat. Macht man dies für unterschiedliche Fokussierungsbedingungen (Ändern der Bestromung der Fokussierlinse) oder unterschiedliche Stellung der Meßstruktur  
20 auf der Strahlachse, so erhält man eine komplette räumliche Strahl-Tomographie.

Die Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 18 ist wiederum im Hinblick darauf von Vorteil, einerseits  
25 für die rückstreuenden Oberflächen oder die größere Durchlässigkeit aufweisenden Oberflächen den notwendigen mechanischen Halt zu schaffen, andererseits aber zu verhindern, daß der mechanische Halt für die Oberflächenunregelmäßigkeiten bezüglich der Absorption/Rückstreuung  
30 in nennenswertem Maße zu unerwünschten gestreuten Elektronen führt.

Das Verfahren gemäß Anspruch 19 gestattet es, unter Verwendung einer regelmäßigen Meßstruktur, die an sich  
35 für die Vermessung des Intensitätsprofils eines Elektro-

nenstrahles gedacht war, zugleich auch die Abbildungseigenschaften der Elektronenstrahl-Optik zu messen.

Mit dem im Anspruch 20 angegebenen Verfahren kann man  
05 sich auf einfache Weise ein einfach auswertbares Gesamtbild über die Abbildungseigenschaften der Optik verschaffen.

Gemäß Anspruch 21 kann man automatisch den Elektronenstrahl so fokussieren, daß der Querschnitt des Elektronenstrahles ein Minimum annimmt.  
10

Die im Anspruch 22 angegebene Meßstruktur hat einen mechanisch besonders einfachen Aufbau.

15 Die Weiterbildung der Meßstruktur gemäß Anspruch 23 dient wieder dazu, Verfälschungen des Meßergebnisses durch geometrische Effekte zu vermeiden.

Eine Meßstruktur gemäß Anspruch 24 zeichnet sich durch  
20 mechanisch besonders einfachen Aufbau und guten Kontrast aus.

Dabei erhält man gemäß Anspruch 25 auf einfache Weise präzise räumlich orientierte und gut rückstreuende Rückstreueflächen.  
25

Die Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 26 gewährleistet wieder, daß die Rückstreueflächen auf einfache Weise zuverlässig und bleibend im Raum orientiert werden,  
30 ohne daß die hierzu verwendeten mechanischen Mittel zu unerwünschten rückgestreuten Elektronen führen.

Die Weiterbildung der Erfindung gemäß Anspruch 27 schafft eine Meßstruktur, die wieder zum Messen des Querschnittsprofils eines Elektronenstrahles für unterschiedliche  
35



Auslenkungswinkel geeignet ist und eine einfache Auswertung des Stromes rückgestreuter Elektronen ermöglicht.

Bei einer Meßstruktur, wie sie im Anspruch 28 angegeben  
05 ist, kann man einerseits auf einfache Weise die Abbildungs-  
eigenschaften der Elektronenstrahl-Optik testen (über die  
Gitterlinien) und zugleich auch die Intensitätsprofile  
des Elektronenstrahles für unterschiedliche Auslenkwinkel  
einfach ermitteln (über die Rückstreueflächen).

10

Der Anspruch 29 betrifft ein Meßverfahren, mit welchem  
aus dem Strom der durch die Meßstruktur hindurchtretenden  
Elektronen der Strahlquerschnitt und/oder die Abbildungs-  
eigenschaften der Optik ermittelt werden.

15

Die Ansprüche 30 bis 33 betreffen Elektronenstrahl-Bear-  
beitungsgeräte, bei denen auf einfache Weise das Intensi-  
tätsprofil des Elektronenstrahles und die Abbildungsei-  
genschaften der Optik für den Elektronenstrahl gemessen  
20 werden können.

Die Weiterbildungen gemäß Anspruch 34 und 35 sind im  
Hinblick auf scharfe und kontrastreiche Abbildung kleiner  
bzw. ausgedehnter Rückstreueflächen einer Meßstruktur von  
25 vorteil.

Bei einem erfindungsgemäßen Verfahren, mit dem die Güte  
der Optik des Elektronenstrahlbearbeitungsgerätes bestimmt  
wird, werden die Sensoren zum Messen der Rückstreuelek-  
tronen so verwendet, daß eine rasterelektronische Aufnahme  
30 einer Meßstruktur gemacht, die Teile mit unterschiedlichen  
Rückstreueigenschaften aufweist, und diese Aufnahme wird  
dann ausgewertet. Aus Verzerrungen in dem Bild kann,  
insbesondere auch unter Zuhilfenahme eines Rechners, auf  
35 die Güte der Magnetoptiken von Fokussiereinheit und Optik

zurückgeschlossen werden.

Verwendet wird hierzu vorzugsweise eine etwas andere  
Meßstruktur, die eine regelmäßige Struktur, insbesondere  
05 ein Gitter oder Netz umfaßt, damit übliche aus der Optik  
bekannte Rechenverfahren zur Berechnung der Verzerrung  
eingesetzt werden können. Bei einer bevorzugten Ausführ-  
ungsform bestehen die Gitter- oder Netzlinien aus einem  
stark rückstreuenden Material, insbesondere einem Metall,  
10 während ihr Untergrund aus einem nicht oder nur schwach  
rückstreuenden Material gebildet ist, beispielsweise  
Graphit.

Auch eine Meßstruktur mit regelmäßig angeordneten Stellen  
15 erhöhter Durchlässigkeit (z. B. Bohrungen) oder mit  
regelmäßig angeordneten Stellen erhöhter Rückstreuung  
(z.B. Rückstreuf Flächen) oder mit einem Gitter oder Netz  
sind Gegenstand der vorliegenden Erfindung, wobei bevor-  
zugte Ausführungsformen die o.g. Materialeigenschaften  
20 aufweisen.

Denkbar ist auch, daß eine Nadel oder mehrere Nadeln mit  
geschliffener Endfläche oder andere Rückstreuelemente,  
die beim Verfahren zum Vermessen des Intensitätsprofils  
25 eingesetzt wird/werden, in eine Meßstruktur mit Gitternetz  
vorzugsweise lösbar eingesetzt sind, um sowohl Intensitäts-  
profile des Strahles als auch Abbildungseigenschaften der  
Optik messen zu können.

30 Alternativ kann man eine Rückstreuf Flächenanordnung und  
eine rückstreuende Gitteranordnung auch auf seitlich benach-  
barten Bereichen der Oberseite der Basis einer Meßstruktur  
vorsehen, so daß dies Bereiche wahlweise auf die Haupt-  
strahlachse gestellt werden können.

35

Nachfolgend werden bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung unter Bezug auf die Zeichnung beschrieben. Dort zeigen:

- 05   Figur 1:   schematisch den Aufbau zum Vermessen des Intensitätsprofils eines Elektronenstrahls eines Elektronenstrahlschweißgeräts;
- 10   Figur 2:   schematisch den Aufbau zum Messen der Abbildungseigenschaften von Magnetoptiken in einem Elektronenstrahlschweißgerät;
- 15   Figur 3:   eine Aufsicht auf eine abgewandelte Meßstruktur mit ein Gitter bildenden schmalen Rückstreubändern;
- 20   Figur 4:   einen transversalen Schnitt durch die Meßstruktur nach Figur 3 längs der dortigen Schnittlinie IV-IV;
- 25   Figur 5:   einen vergrößerten transversalen Schnitt durch ein Rückstreuband der Meßstruktur nach Figur 3;
- 30   Figur 6:   einen transversalen Mittenschnitt durch eine abgewandelte Meßstruktur;
- 35   Figur 7:   einen transversalen Mittelschnitt durch eine nochmals abgewandelte Meßstruktur; und
- 30   Figur 8:   eine Aufsicht auf eine weiter abgewandelte Meßstruktur.

In einem Elektronenstrahlschweißgerät wird ein Elektronenstrahl 10 von einer als einzelne Linse 12 gezeigten steuerbaren Fokussiereinheit fokussiert. Diese kann insbe-

sondere einen Stigmator (zwei unter  $90^\circ$  angeordnete Zylinderlinsen) umfassen, die getrennt steuerbar sind, um die Form des Strahlquerschnittes zu modifizieren, insbesondere auf Kreisform zu bringen.

05

In Figur 1 ist bei A die Hauptstrahlrichtung angedeutet, das ist die Richtung, in welcher der Elektronenstrahl 10 von der nicht im einzelnen dargestellten Elektronenkanone des Schweißgerätes erzeugt wird und in welcher er auf  
10 ein Werkstück (nicht dargestellt) unter Arbeitsbedingungen auftrifft, wenn er nicht abgelenkt wird.

Der Elektronenstrahl 10 kann mittels einer magnetischen Ablenkeinheit 14, die hinter der Linse 12 liegt, senkrecht  
15 zur Strahlrichtung abgelenkt werden. Die Ablenkeinheit 14 umfaßt mindestens zwei getrennt steuerbare Spulen (nicht im einzelnen gezeigt) zur Ablenkung des Elektronenstrahles 10 in zwei zu einander senkrechten Richtungen.

20 Die Fokussiereinheit 12 und die Optik 14 bilden zusammen eine Optik 15 des Elektronenstrahlschweißgerätes.

Zum Vermessen des Intensitätsprofils des Elektronenstrahls 10 ist eine im ganzen mit 16 bezeichnete Meßstruktur  
25 vorgesehen. Diese besteht aus einer als Graphitplatte 18 ausgebildeten Basis mit einer ebenen Oberflächen 20, von der im Zentralbereich, d.h. in dem Bereich, auf den der Elektronenstrahl 10 auftrifft, wenn er von der Ablenkeinheit 14 nicht stark ausgelenkt wird, senkrecht nach oben  
30 eine Wolframnadel 22 absteht.

Die Wolframnadel 22 ist an ihrer zur Elektronenstrahlquelle weisenden, senkrecht auf der Hauptstrahlrichtung A stehenden ebenen Endfläche glatt geschliffen. Auch die  
35 Oberfläche 20 der Graphitplatte 18 steht senkrecht auf

der Hauptrichtungsrichtung A.

Der Durchmesser der Wolframnadel 22 ist so bemessen, daß er deutlich kleiner als der Durchmesser des Elektronenstrahls 10 ist.

Die Wahl der Materialien für die Meßstruktur 16 und ihre Geometrie und Anordnung bewirken folgendes:

- 10 Die glattgeschliffene transversale Endfläche der Wolframnadel 22 wirkt stark rückstreuend, d.h. Elektronen aus dem Elektronenstrahl 10 werden in die Richtung A, aus der der Elektronenstrahl 10 kommt bzw. in eine Richtung mit einer Komponente in die Richtung der Elektronenquelle, zurück-
- 15 gelenkt. Rückstreuelektronen von der Nadel 22, die erhalten werden, wenn der Elektronenstrahl 10 die Spitze der Nadel 22 überstreicht, sind in Figur 1 schematisch bei 24 angedeutet. Die Graphitplatte 18 hingegen wirkt kaum rückstreuend, so daß sich die Wolframnadel 22 gegen die
- 20 Oberfläche 20 stark abhebt.

Die Rückstreuelektronen werden mittels eines Sensorrings, der im ganzen mit 26 bezeichnet ist und aus vier Sensorsegmenten 28 besteht, vermessen, wobei der Sensorring 26

25 den Pfad des Elektronenstrahls im Querschnitt gesehen umgibt, wobei der Sensorring ein herkömmlicher Ring der Art ist, wie er üblicherweise in rasterelektronischen Beobachtungseinrichtungen zum Auffangen von Rückstreuelektronen verwendet wird. Aus diesem Grund kann der

30 Sensorring 26 sowohl zur Messung des Stromes der Rückstreuelektronen als auch zur Bildgebung verwendet werden.

Bei der Erfindung geht es zunächst darum, die Stärke des Rückstreuelektronenstroms zu bestimmen, wobei es nicht

35 in erster Linie um die absolute Zahl der Rückstreuelek-

tronen geht, die ja von dem Sensorring gar nicht alle  
erfaßt werden, sondern um das relative Intensitätsprofil  
des Elektronenstrahls 10, also die Verteilung der Elek-  
tronen im Elektronenstrahl 10 in zur Strahlrichtung  
05 senkrechter Richtung.

Unter Strahlrichtung S soll die mittlere Richtung des  
Elektronenstrahles verstanden werden, wie sie von der  
Optik 14 erzeugt wird, abgesehen von Auslenkungen kleiner  
10 Amplitude, die erfolgen, um den Elektronenstrahl 10 über  
der Endfläche einer Wolframnadel 22 zu rastern.

Wird der Elektronenstrahl 10 von der Ablenkeinheit 14 auf  
verschiedene Stellen der Meßstruktur 16 geleitet, so erhöht  
15 und erniedrigt sich die Zahl der Rückstreuelektronen  
24 je nach der Stelle auf der Meßstruktur 16, auf die der  
Elektronenstrahl 10 auftrifft. Eine besonders hohe Zahl  
von Rückstreuelektronen wird erzielt, wenn der Elektronen-  
strahl 10 auf die Wolframnadel 22 trifft.

20 Da der Elektronenstrahl 10 in seinem Durchmesser in der  
Ebene der Meßstruktur 16 bzw. der Oberfläche 20 größer  
ist als die Wolframnadel 22, treffen beim Überstreichen  
der Wolframnadel 22 durch den Elektronenstrahl 10 ver-  
25 schiedene Elektronenstrahlteile auf die Wolframnadel auf,  
und eine unterschiedliche Intensität des Strahls in diesen  
Teilen führt zu einer unterschiedlichen Zahl von Rück-  
streuelektronen.

30 Um das Strahlprofil systematisch zu erfassen (bzw. bei  
Arbeitsbedingungen des Elektronenstrahl über die Werk-  
stückoberfläche zu führen), wird die Optik 15 von einer  
Rechen-, Steuer- und Speichereinheit 30 elektronisch  
gesteuert, und Signale von dem Sensorring werden der  
35 Rechen-, Steuer- und Speichereinheit 30 zugeführt und in

Abhängigkeit von den Ablenk-Steuersignalen erfaßt. Dabei sind die Fokussiereeinheit 12 und die Ablenkeinheit 14 getrennt steuerbar.

- 05 Dies bedeutet im Meßmodus, daß in Abhängigkeit von einer Größe  $x$  (der Auslenkung in  $x$ -Richtung; vgl. das Koordinatensystem in Figur 1) und einer Größe  $y$  (der Auslenkung in  $y$ -Richtung) des Elektronenstrahls 10, welche durch die Optik 15 erzeugt wird, der Strom der Rückstreuelektronen  
10 24, die zum Sensorring 26 gelangen, erfaßt wird, wobei diese Daten als dreidimensionale Flächen (nicht gezeigt) ausgegeben werden können, oder auch in Form eines Bildes 32, das die Elektronendichte an einer bestimmten Stelle  $z$  des Elektronenstrahles in einer zur Strahlrichtung  $S$   
15 bzw. zur Hauptstrahlrichtung  $A$  senkrechten Richtung wiedergibt.

- Mit einer anderen Meßstruktur, die in Figur 2 gezeigt ist und dort im ganzen mit 34 bezeichnet ist, läßt sich  
20 unter Verwendung im wesentlichen desselben Aufbaus die Güte der Linse 12 und der Ablenkeinheit 14 vermessen, was eine wichtige Information zur Beurteilung der Qualität des Elektronenstrahlschweißgeräts darstellt.

- 25 Die Meßstruktur 34 umfaßt auch hier eine Graphitplatte 18 mit einer Oberfläche 20. Im Zentralbereich der Graphitplatte 18 befindet sich auf der Oberfläche 20 jedoch ein Metallnetz 36, d.h. ein Netz, dessen Netzlinien aus Metall bestehen. Das Netz kann direkt auf dem Graphit 18 aufliegen,  
30 so daß auch hier Rückstreuelektronen 24 von den Linien des Netzes ausgesandt werden, während der Graphithintergrund nicht rückstreuend wirkt.

- Ein Unterschied zu Figur 1 besteht auch insofern, als zur  
35 besseren Abbildung des Netzes 36 der Ort von Linse 12 und

Ablenkeinheit 14 vertauscht sind.

Unter Verwendung eines üblichen rasterelektronenmikroskopischen Bilderzeugungsverfahrens kann mittels des Sensor-  
05 rings 26 ein Bild 38 des Metallnetzes 36 vor dem Graphit-  
untergrund erzeugt werden. Mittels der dem Fachmann  
geläufigen Computerauswertung des Bildes 38 kann auf-  
grund von Abweichungen der einzelnen Linien von deren  
geradem Verlauf und den Verzerrungen am Rand des abgebil-  
10 deten Netzes auf die Güte der Magnetooptiken der Ablenk-  
einheit 14 rückgeschlossen werden.

Die Meßstruktur 34 kann - in Abwandlung - Teil der Meß-  
struktur 16 aus Figur 1 sein, wobei dann die Wolframnadel  
15 22 in einer kleinen Graphitplatte in die große Graphit-  
platte 18 eingesetzt wird, und wenn sie dann entfernt  
wird, ist das Metallnetz 36 in der Graphitplatte 18 dann  
freigegeben.

20 Möglicherweise muß dann die Linse 12 nachfokussiert werden,  
damit das Netz scharf abgebildet wird, während sie vorher  
auf die Oberfläche 20, aus der die Wolframnadel 22 heraus-  
stand, fokussiert war. Alternativ kann man die Entfernungsdifferenz  
auch durch eine aus Graphit gefertigte Distanz-  
25 platte aufnehmen.

Nochmals alternativ kann man eine Nadelanordnung und eine  
Gitteranordnung auch nebeneinander liegend auf einer ge-  
meinsamen Basis-Graphitplatte vorsehen und die beiden  
30 Teilbereiche der Graphitplatte alternativ in den Strahlen-  
gang stellen, z.B. mit einer kalibrierten Gewindespindel  
oder mit einem kleinen Arbeitszylinder und die Platten-  
endlagen vorgebenden Anschlägen.

35 Die Meßstrukturen 16 und 34 bzw. die oben angesprochenen



- kombinierten Meßstrukturen sind so ausgelegt, daß sie leicht und präzise in das Elektronenstrahlschweißgerät eingesetzt werden können und auch leicht wieder entnommen werden können (z.B. unter Verwendung von Paßstiften),
- 05 damit das Elektronenstrahlschweißgerät seine eigentliche Funktion ausüben kann. Es genügt hierfür, wenn in einer Abbildungsebene die Möglichkeit zur genau positionierten Anbringung der Graphitplatte 18 besteht.
- 10 Da die Meßstrukturen 16 und 34 passive Komponenten sind, müssen keine zusätzlichen Leitungen in den Meßraum/Arbeitsraum des Elektronenstrahlschweißgerätes verlegt werden, um den Strahlquerschnitt und die abbildungseigenschaften der Optik 15 zu bestimmen.
- 15
- Figur 3 zeigt in Aufsicht eine Meßstruktur 16, die wieder eine Basis 20 aus Graphit aufweist. Die obere Begrenzungsfläche der Basis 20 ist konkav kugelförmig gewölbt, wobei der Radius der oberen Stirnfläche 40 dem Abstand der Basis
- 20 20 vom Hauptpunkt H der Strahl-Ablenkeinheit 14 des Elektronenstrahl-Schweißgerätes entspricht. Unter dem "Hauptpunkt" soll derjenige Punkt verstanden werden, an dem der Elektronenstrahl bei idealisierter Darstellung von der Einfallrichtung abknickt (ähnlich wie bei optischen
- 25 Linsen).
- Auf die Stirnfläche 40 ist ein Netz 42 aufgebracht, welches aus unter rechtem Winkel zueinander angeordneten Sätzen von Rückstreubändern 44, 46 besteht. Die Rückstreu-
- 30 bänder 44, 46 sind wieder aus einem Metall hoher Dichte wie z.B. Wolfram hergestellt und können auf eine beliebige bekannte Weise hergestellt sein, z.B. durch Herausschneiden aus einem dünnen polierten Blech mit einem Laserstrahl oder durch Aufkleben von entsprechend schmalen polierten
- 35 Bändern im gewünschten Muster auf die Stirnfläche 40.

Wie aus Figur 5 ersichtlich, ist der Querschnitt der Rückstreubänder 46 rechteckig, so daß deren freie Oberseiten jeweils eine Rückstreufäche 48 bilden.

05

Um mit einer solchen Meßstruktur auch das Intensitätsprofil für verschieden Strahlauslenkungen messen zu können, kann man in der Mitte ausgesuchter oder aller der Gitterzellen jeweils eine vorzugsweise sehr kurze Wolframnadel 22 mit im wesentlichen in der Fläche der benachbarten Rückstreubänder 44, 46 liegender Endfläche versehen. Dadurch, daß man den Elektronenstrahl mit kleiner Amplitude über den verschiedenen Wolframnadeln 22 aufrastert, kann man dann die Intensitätsprofile des Elektronenstrahles 10 für unterschiedliche Auslenkwinkel messen, durch Auslenkung des Elektronenstrahles über die Gitterlinien hinweg die Abbildungseigenschaften der durch Fokussiereinheit 12 und Ablenkeinheit 14 gebildeten Optik 15.

20 Figur 6 zeigt einen Mittenschnitt durch eine weiter abgewandelte Meßstruktur 16, bei welcher die Basis 20 einzelne Wolframnadeln 22 trägt, die jeweils so schräg gestellt sind, daß ihre Achse durch den Hauptpunkt H der Elektronenstrahl-Ablenkeinheit verläuft. Die Meßstruktur 16 nach Figur 6 hat somit eine Vielzahl von kleinen Rückstreufächen, die jeweils senkrecht auf der Richtung eines ausgelenkten Elektronenstrahles stehen und gleichen Abstand vom Hauptpunkt H aufweisen.

30 Die Wolframnadeln 22 sind entweder so angeordnet, daß ihre Fußabschnitte auf der Oberseite der Basis 20 ein quadratisches Gitter bilden, oder auch so, daß jeweils ein Satz von Wolframnadeln 22 unter gleichem Abstand von der Achse der Elektronenkanone angeordnet sind und die zu diesem Satz gehörenden Wolframnadeln 22 in Umfangs-

richtung unter äquidistantem Winkelabstand angeordnet sind.

- Die weiter abgewandelte Meßstruktur nach Figur 7 ähnelt  
05 im rechten Teil derjenigen nach Figur 6 mit der Maßgabe, daß die Enden der Wolframnadeln 22 alle in derselben Ebene liegen und vorzugsweise dort so angeordnet sind, daß die Endflächen ein quadratisches Gitter bilden.
- 10 In der linken Hälfte von Figur 7 stehen die Wolframnadeln 22 alle senkrecht auf der Oberfläche der Basis 20. Eine solche Anordnung der Wolframnadeln 22 kann zuweilen dann von Interesse sein, wenn man nicht an der Intensitätsverteilung der Elektronen im Elektronenstrahl an sich  
15 (senkrecht zur Strahlrichtung S) interessiert ist sondern nur an der Elektronenverteilung, soweit sie für das Schweißen relevant ist (oder auch dann, wenn der Ablenkradius groß gegen die Auslenkstrecke ist). Da beim Schweißen die Werkstückoberfläche in der Regel senkrecht auf  
20 der Hauptstrahlrichtung A der Elektronenkanone steht, bilden die vielen rückstreuenden Endflächen der Wolframnadeln 22 gemäß der linken Hälfte von Figur 7 die Werkstückoberfläche an einer Vielzahl von Stützstellen nach.
- 25 Das Ausführungsbeispiel nach Figur 8 zeigt eine Meßanordnung zum Messen von Strahlquerschnitt und Abbildungseigenschaften, die eine Meßstruktur 16 und eine hinter dieser liegende elektrisch leitende Kollektorplatte 50 umfaßt. Die Meßstruktur 16 besteht aus einer Platte 52  
30 aus Wolfram, in die in regelmäßigem Raster kleinen Durchmesser aufweisende Bohrungen 54 eingearbeitet sind, z.B. durch Elektronenstrahlbohren.

- Diese Anordnung arbeitet in Transmission und misst den  
35 Strom der von der mit einem Strommesser (nicht gezeigt) verbundenen Kollektorplatte 50 aufgefangenen Elektronen in Abhängigkeit von der Auslenkung (und ggf. der Fokussierung) des Elektronenstrahles.

Patentansprüche

=====

1. Verfahren zum Vermessen des Intensitätsprofils eines  
05 Elektronenstrahls (10), insbesondere eines Strahls  
eines Elektronenstrahlbearbeitungsgeräts, und/oder zum Ver-  
messen einer Optik (15) für einen Elektronenstrahl und/oder  
zum Justieren einer Optik (15) für einen Elektronen-  
10 strahl, bei dem der Elektronenstrahl durch eine Relativ-  
bewegung zwischen Elektronenstrahl und einer Meßstruktur  
(16) auf verschiedene Stellen (22, 20) von dieser geleitet  
wird, die unterschiedliche Rückstreueigenschaften aufweisen,  
dadurch gekennzeichnet, daß ein Strom von der Meßstruktur  
(16) in Rückwärtsrichtung gestreuter Elektronen in Abhän-  
15 gigkeit von der Relativbewegung von Elektronenstrahl (10)  
und Meßstruktur (16) gemessen wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,  
daß eine Meßstruktur (16) verwendet wird, die zumindest  
20 eine den Elektronenstrahl durchlassende Öffnung, insbe-  
sondere einen Schlitz oder ein kreisförmiges Loch auf-  
weist.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,  
25 daß eine Meßstruktur (16) verwendet wird, die zumin-  
dest eine den Elektronenstrahl zumindest teilweise zurück-  
werfende Rückstreufäche aufweist.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet,  
30 daß die Rückstreufäche senkrecht auf der mittleren  
Richtung des Elektronenstrahles steht.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet,  
daß die Rückstreufäche von einer Erhebung (22) getra-  
35 gen ist.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet,  
daß die Erhebung von einer Nadel (22), vorzugsweise  
einer Metallnadel, insbesondere aus einem schweren Metall  
05 wie Wolfram, gebildet wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet,  
daß die Nadel (22) an ihrem Ende geschliffen ist.
- 10 8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeich-  
net, daß die Achse der Nadel (22) parallel zur mitt-  
leren Richtung des Elektronenstrahles verläuft.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 8, dadurch  
15 gekennzeichnet, daß der Schlitz, das Loch oder die  
Rückstreuefläche in zumindest einer Richtung eine Quer-  
schnittslänge hat, die kleiner als der Elektronen-  
strahldurchmesser ist.
- 20 10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet, daß der Strom der Rückstreu-  
elektronen (20) mittels eines Sensorringes (26) gemessen  
wird, der vorzugsweise eine Mehrzahl um die Achse des  
Elektronenstrahles (10) verteilter, vorzugsweise äquidistant  
25 verteilter, Sensorsegmente (28) umfaßt.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet, daß die Relativbewegung  
durch Ablenken des Elektronenstrahls mittels eines Mag-  
30 netfeldes (14) oder elektrischen Feldes erzeugt wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch  
gekennzeichnet, daß eine Meßstruktur (16) verwendet  
wird, die eine Mehrzahl von Schlitzen und/oder Löchern  
35 und/oder Rückstreueflächen aufweist, die unter unterschied-

lichem Abstand von der Einfallsrichtung des nicht abgelenkten Elektronenstrahles angeordnet sind.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet,  
05 daß eine Meßstruktur (16) verwendet wird, bei welcher die Schlitze, Löcher oder Rückstreulächen gleichförmig in radialer Richtung und/oder Umfangsrichtung verteilt angeordnet sind.

10 14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß eine Meßstruktur (16) verwendet wird, bei welcher die Löcher und/oder Rückstreulächen so ausgerichtet sind, daß ihre Achse bzw. Normale durch den Hauptpunkt der Optik (15) verläuft.

15 15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Rückstreulächen kreisförmig sind.

20 16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Rückstreulächen die Form schmaler Bänder haben.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch  
25 gekennzeichnet, daß die Relativbewegung zwischen Elektronenstrahl und Meßstruktur in zwei unabhängigen Richtungen erfolgt, die im wesentlichen in einer senkrecht zur Einfallsrichtung des nicht abgelenkten Elektronenstrahls (10) liegenden Ebene liegen.

30 18. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß eine Meßstruktur (16) verwendet wird, die in der Nachbarschaft der Schlitze und/oder Öffnungen und/oder Rückstreulächen eine ebene Oberfläche  
35 (20) aus schwach oder gar nicht rückstreuenden Material

aufweist, die insbesondere aus Graphit besteht.

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18 zur  
Vermessung der Elektronenstrahl-Optik, dadurch gekenn-  
05 zeichnet, daß an einer Mehrzahl von Schlitz- und/ oder  
Öffnungen und/oder Rückstreulächen, die unterschiedliche  
Lage bezüglich der Einfallrichtung des nicht abgelenkten  
Elektronenstrahles aufweisen, der Strahlquerschnitt des  
Elektronenstrahles vermessen wird und mit einem Strahl-  
10 querschnitt eines Elektronenstrahles verglichen wird, wie  
er bei fehlerfreier Elektronenstrahl-Optik erhalten wird,  
und/oder die Abbildungseigenschaften der Optik (15)  
gemessen werden.
- 15 20. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet,  
daß die Meßstruktur als Gitter ausgebildet wird,  
daß durch die Relativbewegung zwischen Elektronenstrahl  
und Meßstruktur (16) zumindest ein erheblicher Teil  
des Gitters vom Elektronenstrahl getroffen wird und  
20 der Strom der rückgestreuten Elektronen in Abhängigkeit  
von der Relativbewegung in ein Bild der Meßstruktur  
umgesetzt wird und dieses Bild mit einem Sollbild der  
Meßstruktur verglichen wird, wie es bei fehlerfreier  
Elektronenstrahl-Optik erhalten wird.
- 25 21. Verfahren zum Kompensieren von Ablenkungsfehlern einer  
Elektronenstrahl-Optik, bei welchem die Abbildungseigen-  
schaften der Elektronenstrahl-Optik (15) mit dem Verfahren  
gemäß Anspruch 19 oder 20 ermittelt werden und zumindest  
30 eine steuerbare Komponente der Optik so nachgeregelt wird,  
daß der Unterschied zwischen Ist-Bild und Soll-Bild der  
Meßstruktur minimiert wird.
22. Meßstruktur, insbesondere zur Verwendung in einem  
35 Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 22, dadurch

gekennzeichnet, daß sie eine Basis aufweist, die mindestens einen Schlitz und/oder eine Öffnung und/ oder eine Rückstreufäche aufweist.

- 05 23. Meßstruktur nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, daß die Ebenen der Schlitz und/oder die Achsen der Öffnungen und/oder die Normale der Rückstreufächen durch einen Hauptpunkt der Optik verlaufen.
- 10 24. Meßstruktur nach Anspruch 22 oder 23, dadurch gekennzeichnet, daß die Rückstreufächen durch Endflächen von Nadeln (22) gebildet sind, die vorzugsweise aus Metall, insbesondere aus einem schweren Metall wie Wolfram, gefertigt sind und von der Basis getragen sind.
- 15 25. Meßstruktur nach Anspruch 24, bei der die Nadel (22) an ihrem freien Ende glatt geschliffen ist, vorzugsweise im wesentlichen parallel zur ebenen Oberfläche (20) der Basis.
- 20 26. Meßstruktur nach einem der Ansprüche 22 bis 25, dadurch gekennzeichnet, daß die ebene Oberfläche (20) der Basis aus schwach oder gar nicht rückstreuendem Material, insbesondere aus Graphit, gebildet ist.
- 25 27. Meßstruktur nach einem der Ansprüche 22 bis 26, dadurch gekennzeichnet, daß sie rückstreuende Bänder (46) aufweist, die ein Gitter bilden, und in den durch die Kanten der Gittermaschen begrenzten Flächen zusätzlich
- 30 jeweils mindestens eine Rückstreufäche (22) aufweist.
28. Meßstruktur nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, daß die Rückstreufächen (22) jeweils bei der Mitte der durch die Gitterlinien begrenzten Flächen liegen.



29. Meßstruktur nach einem der Ansprüche 22 bis 28, gekennzeichnet durch eine in Strahlrichtung gesehen hinter ihr liegende Kollektorplatte (50).
- 05 30. Elektronenstrahlbearbeitungsgerät, mit:
- einer Meßstruktur nach einem der Ansprüche 22 bis 29, und
  - einem im Elektronenstrahlgang vor der Meßstruktur
- 10 angeordneten Rückstreuelektronenmeßgerät (26).
31. Elektronenstrahlbearbeitungsgerät nach Anspruch 30 dadurch gekennzeichnet, daß das Rückstreuelektronenmeßgerät einen Sensorring (26) umfaßt, der vorzugsweise
- 15 eine Mehrzahl in Umfangsrichtung verteilter, vorzugsweise gleich verteilter Sensorsegmente (28) aufweist.
32. Elektronenstrahlbearbeitungsgerät nach Anspruch 30 oder 31, gekennzeichnet durch eine Optik (15), die mittels
- 20 Steuersignalen einer Steuereinheit (30) elektronisch gesteuert wird, wobei eine Speichereinheit (30) gleichzeitig Signale von dem Rückstreuelektronenmeßgerät (26) in Abhängigkeit von den Steuersignalen erfaßt.
- 25 33. Elektronenstrahlbearbeitungsgerät nach Anspruch 31, dadurch gekennzeichnet, daß die Optik (15) mit der Steuereinheit (30) sowie das Rückstreuelektronenmeßgerät (26) zum Erzeugen eines rasterelektronenmikroskopischen Bildes ausgelegt sind.
- 30 34. Elektronenstrahlbearbeitungsgerät nach Anspruch 31, dadurch gekennzeichnet, daß bei einer im wesentlichen punktförmigen Rückstreuefläche (22) der Meßstruktur (16) in einer Elektronenstrahl-Optik (15) eine Fokussierlinse
- 35 (12) in Strahlrichtung gesehen vor einer Strahl-Ablenk-

einheit (14) steht.

35. Elektronenstrahlbearbeitungsgerät nach Anspruch 31, da-  
durch gekennzeichnet, daß bei einer ausgedehnten Rück-  
05 streufläche (22) der Meßstruktur (16) in einer Elek-  
tronenstrahl-Optik (15) eine Fokussierlinse (12) in  
Strahlrichtung gesehen hinter einer Strahl-Ablenkeinheit  
(14) steht.

## Zusammenfassung

=====

Zur Messung des Intensitätsprofils eines Elektronenstrahls  
05 wird der Elektronenstrahl (10) auf eine Meßstruktur  
(16) geleitet, die Stellen (20, 22) mit unterschiedlichen  
Rückstreueigenschaften aufweist, und Rückstreuelektronen  
(24), die bei einer Abrasterung der Meßstruktur (16)  
durch den Elektronenstrahl (10) mittels einer Ablenkein-  
10 heit (14) entstehen, werden von einem Sensorring (26)  
gemessen. Die Meßstruktur (16) ist vorzugsweise in ein  
Elektronenstrahlschweißgerät ein- und ausbaubar und besteht  
aus einer Graphitplatte (18), von der eine Wolframnadel  
(22) senkrecht wegsteht.

15

(Figur 1)